



⑮ **BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND**



**DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT**

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑩ **DE 101 23 725 A 1**

⑤① Int. Cl. 7:  
**G 03 F 7/20**  
G 02 B 5/30

⑳ Aktenzeichen: 101 23 725.1  
㉔ Anmeldetag: 15. 5. 2001  
㉕ Offenlegungstag: 21. 11. 2002

DE 101 23 725 A 1

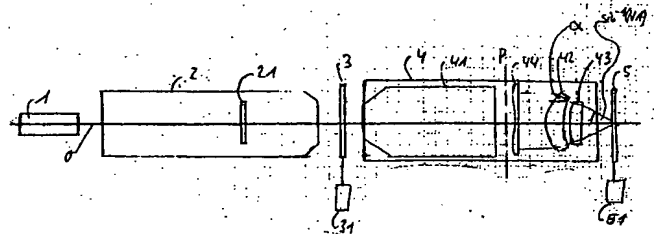
㉑ **Anmelder:**  
Carl Zeiss, 89518 Heidenheim, DE

㉒ **Erfinder:**  
Wagner, Christian, Dr., 73430 Aalen, DE; Brunotte,  
Martin, Dr., 73431 Aalen, DE; Kaiser, Winfried,  
73431 Aalen, DE

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

⑤④ **Projektionsbelichtungsanlage der Mikrolithographie, Optisches System und Herstellverfahren**

⑤⑦ Bei einer Projektionsbelichtungsanlage, besonderes mit 157 oder 193 nm und bildseitiger NA von 0,8 bis 0,95, mit Fluorid-Kristall-Linsen (42, 43) wird deren winkelabhängige Doppelbrechung durch Relativdrehung um die optische Achse (O) und/oder durch ein Korrekturelement (44) nahe einer Pupillenebene (P) in ihrem störenden Effekt vermindert.



DE 101 23 725 A 1

**BEST AVAILABLE COPY**

## Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Projektionsbelichtungsanlage der Mikrolithographie nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1.

[0002] Derartige Projektionsbelichtungsanlagen sind bekannt, z. B. aus der nicht vorveröffentlichten DE 100 10 131.3 vom 03.03.00 (US ser. No. 09/797,961 vom 05.03.01). Dort ist (vgl. Anspruch 8) der Ausgleich von Störeinflüssen optischer Komponenten auf die Polarisationsverteilung durch Vorhalt an anderen Komponenten vorgesehen, allerdings bezogen auf die polarisationsselektive Reflexion und auf Spannungsdoppelbrechung.

[0003] Die Patentanmeldung PCT/EP 00/13184 zeigt für derartige Projektionsbelichtungsanlagen geeignete rein refraktive und katadioptrische Projektionsobjektive mit numerischen Aperturen von 0,8 und 0,9, bei einer Betriebswellenlänge bei 157 nm.

[0004] Aus der DE 198 07 120 A (US ser. No. 09/252,636) ist der Einsatz von lokal in der Dicke variierenden doppelbrechenden Elementen zum Ausgleich von über ein Lichtbündel variierenden Polarisierungseffekten bekannt.

[0005] Die US 6,201,634 B beschreibt, daß für diesen Einsatz geeignete technische Fluoridkristalle Spannungsdoppelbrechung aufweisen, die bezogen auf die Kristallachsen Richtungsabhängigkeit zeigt.

[0006] Aus der Internet-Publikation "Preliminary Determination of an Intrinsic Birefringence in  $\text{CaF}_2$ " von John H. Burnett, Eric L. Shirley, und Zachary H. Levine, NIST Gaithersburg MD 20899 USA (verbreitet am 07.05.01) ist bekannt, daß Kalziumfluorid-Einkristalle außer spannungsinduzierter auch intrinsische Doppelbrechung aufweisen.

[0007] Alle zitierten Schriften sollen in vollem Umfang auch Teil der Offenbarung dieser Anmeldung sein. Das gleiche gilt für die gleichzeitig eingereichte Patentanmeldung der gleichen Erfinder mit dem Titel "Optisches Element, Projektionsobjektiv und mikrolithographische Projektionsbelichtungsanlage mit Fluorid-Kristalllinsen", deren Maßnahmen auch in Kombination mit der vorliegenden Erfindung vorteilhaft sind.

[0008] Erheblich sind diese Doppelbrechungseffekte erst bei den niedrigen Wellenlängen unterhalb etwa 200 nm, also insbesondere bei 193 nm und verstärkt bei 157 nm, den für die hochauflösende Mikrolithographie bevorzugten Wellenlängen.

[0009] Da diese Doppelbrechung von der Lichtstrahlrichtung bezogen auf die Kristallachsen abhängig ist, ergibt sich eine Variation als Funktion sowohl des Öffnungswinkels wie auch des Drehwinkels (Azimutwinkels) um die optische Achse.

[0010] Für ein optisches Element, insbesondere eine Linse (die auch als Planplatte, z. B. Abschlußplatte, Filter, ausgebildet sein kann), das rotationssymmetrisch um die (111) Kristallachse orientiert ist, ist die Doppelbrechung bei senkrechtem Durchtritt eines Lichtstrahls minimal. Unter einem Öffnungswinkel von ca.  $35^\circ$  und unter drei gegeneinander um  $120^\circ$  verdrehten Drehwinkeln (Azimutwinkeln) ist die Einfallrichtung jedoch äquivalent der (110) Orientierung des Kristalls, und es tritt maximale Doppelbrechung auf.

[0011] Bei einer Anordnung rotationssymmetrisch zu einer der (100), (010), oder (001) Achsen, liegen unter einem Öffnungswinkel von  $45^\circ$  in jetzt vierzähliger Rotationssymmetrie wieder die (110) äquivalenten Achsen mit maximaler Doppelbrechung. Dies wird in obengenannter gleichzeitiger Patentanmeldung der gleichen Erfinder näher beschrieben.

[0012] Nun ist bei einem Element aus  $\text{CaF}_2$ , aus dem ein 157 nm Lichtstrahl mit der numerischen Apertur 0,8 austritt, der Öffnungswinkel im Durchtritt mit dem Brechungsindex

von ca. 1,56 gleich  $31^\circ$ ; für  $\text{NA} = 0,9$  ergibt sich ein Winkel von etwa  $35^\circ$ . Die richtungsabhängige Doppelbrechung ist also bei so hoch geöffneten Systemen ein Problem.

[0013] Aufgabe der Erfindung ist es daher, eine Kompensation dieser Störung durch richtungsabhängige Doppelbrechung anzugeben, mit der auch höchstaperturige Projektionsobjektive optimal betrieben werden können.

[0014] Gelöst wird diese Aufgabe durch eine Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 1, sowie durch ein optisches System nach Anspruch 9 oder 12 und durch Herstellungsverfahren nach Anspruch 15 bzw. 17.

[0015] Die Erfindung geht aus von der Erkenntnis, daß zum einen die Störung durch die Doppelbrechung bei dem Wert von ca. 6 nm pro cm bei einem in Frage kommenden Lichtweg in Linsen bei den hohen Winkeln von rund 10 cm überwiegend eine Phasenverschiebung von bis zu etwa  $\lambda/4$  für zwei zueinander senkrecht polarisierte Strahlen darstellt, daß weiter die hohen Strahlwinkel in bildnahen (feldnahen) Elementen auftreten, deren Strahl-Winkel-Verteilungen in einer dazu fouriertransformierten Pupillenebene als Orts-Verteilungen vorliegen.

[0016] Damit kann überraschend die Störung durch ein ortsabhängig phasenschiebendes bzw. polarisationsdrehendes Element nahe einer Pupillenebene korrigiert werden. Solche Elemente und ihre Herstellung durch lokales Polieren, insbesondere durch Ionenstrahlpolieren, sind wie oben angegeben aber bekannt und auch in diesem neuen Zusammenhang verfügbar.

[0017] Die Lage "nahe" einer Pupillenebene, vorzugsweise der Systemaperturebene, ist eine praktische Annäherung an die Lage, bei der hinreichend gut die örtliche Verteilung von Polarisation und Phase am Korrektorelement in ihre Winkelverteilung am winkelabhängig doppelbrechenden Element transformiert wird. Dies ist insbesondere mit dem optischen Design des Projektionsobjektivs abzustimmen.

[0018] Neben diesem Ansatz der Ansprüche 1 und 9 ist es auch allein oder in Kombination damit (Ansprüche 13, 14) möglich, die Doppelbrechungseffekte mehrerer derartiger Elemente dadurch zu mindern, daß sie nach Anspruch 12 verdreht gegeneinander eingebaut werden.

[0019] Zwar ist es gängige Praxis, bei der Montage und Justage optischer Systeme exemplarspezifische Störungen gefäster Elemente durch Verdrehen gegeneinander zu kompensieren. Hier wird aber die durch die winkelabhängige Doppelbrechung aufgehobene Rotationssymmetrie durch eine vom optischen Design vorgegebene Relativdrehung berücksichtigt und die Störung vermindert.

[0020] Im Beispiel zweier gleich dicker, unter gleichen Winkeln durchlaufener Kalziumfluorid-Elemente in (111)-Orientierung wird man beide um  $60^\circ$  gegeneinander verdrehen, so daß gerade Maxima und Minima der jeweiligen Doppelbrechung überlagert werden, was den Effekt etwa halbiert. Eine zugehörige Korrekturplatte weist dann sechszählige Rotationssymmetrie auf.

[0021] Da sowohl die Störung als auch die erforderliche Formveränderung am Korrektorelement gering sind, ist es möglich, bei der Herstellung eines Projektionsobjektivs dieses zunächst vollständig aufzubauen und zu justieren und es dann gemäß Anspruch 15 zu vermessen und nachzubearbeiten. Intrinsische und exemplarspezifische Spannungsdoppelbrechung können dann zugleich kompensiert werden.

[0022] Vorteilhafte Ausführungsformen sind Gegenstand der Unteransprüche.

[0023] Die Ausführung nach Anspruch 8 sieht dabei im Projektionsobjektiv eine Umwandlung von radialer zu tangentialer Polarisation mit einem optisch aktiven Element vor, die in der gleichzeitig eingereichten Patentanmeldung

"Optisches Abbildungssystem mit Polarisationsmitteln und Quarzkristallplatte hierfür", Erfinder Dr. Michael Gerhard, ausführlich erläutert ist. Diese Anmeldung ist in vollem Umfang auch Teil dieser Anmeldung.

[0024] Näher erläutert wird die Erfindung anhand der Zeichnung.

[0025] Fig. 1 zeigt schematisch eine erfindungsgemäße Projektionsbelichtungsanlage.

[0026] Bezogen auf eine optische Achse O angeordnet zeigt Fig. 1 eine Lichtquelle 1, die vorzugsweise ein bei 157 nm oder 193 nm schmalbandig emittierender Laser ist. Deren Licht wird einem Beleuchtungssystem 2 zugeführt, das als Besonderheit Mittel 21 zur Erzeugung radialer Polarisation enthalten kann, wie sie aus DE 195 35 392 A1 und obengenannter Patentanmeldung des Erfinders Gerhard bekannt sind. Damit wird ein mikrolithographisches Retikel 3 beleuchtet, das mit einem Retikel-Halte- und Positioniersystem 31 verbunden ist. Das folgende Projektionsobjektiv 4 bildet das Retikel auf das in der Bildebene angeordnete Objekt 5 – typisch den Wafer – ab.

[0027] Das Objekt 5 ist mit einem Objekt-Halte- und Positioniersystem versehen.

[0028] Das Objektiv 4 umfaßt eine Gruppe 41 mit Linsen und bedarfsweise auch einem oder mehreren Spiegeln, eine Pupillenebene bzw. Systemaperturebene P und zwischen dieser Ebene P und der Ebene des Objekts 5 Linsen 42, 43, deren Durchtrittswinkel  $\alpha$  durch die Bildseitige Numerische Apertur NA des Projektionsobjektivs geprägt ist.

[0029] Mindestens eine der Linsen 42, 43 besteht aus einem Material mit winkelabhängiger Doppelbrechung, beispielsweise Kalziumfluorid dessen (111) Orientierung mit der optischen Achse O zusammenfällt oder bis zu ca. 5° abweicht.

[0030] Sind beide gezeigten Linsen 42, 43 (natürlich sind in diesem Bereich überwiegend noch mehr Linsen erforderlich) derartig, so werden sie vorzugsweise um den Azimutwinkel, also um die optische Achse O verdreht gegeneinander eingebaut.

[0031] Für jeden Lichtstrahl ist ein an einer der feldnahen Linsen 42, 43 auftretender Öffnungswinkel in der Nähe der Pupillenebene P zu einem Abstand von der optischen Achse O transformiert. Das dort erfindungsgemäß angeordnete Korrektorelement 44 aus doppelbrechendem oder optisch aktivem Material kann deshalb mit einer vom Abstand zur optischen Achse O und mit dem Azimutwinkel variierenden Dicke und damit Phasenschiebung bzw. Polarisationsdrehung die winkelabhängige Doppelbrechung der Linsen 42, 43 kompensieren.

[0032] Die Mittel 21 und das Korrektorelement 44 können im Sinne der zitierten Patentanmeldung des Erfinders Gerhard ausgeführt sein und so radiale Polarisation am Objekt 5 erzeugen, wobei im Sinne der Erfindung das Korrektorelement 44 zugleich die winkelabhängige Doppelbrechung kompensiert.

[0033] Hat das Projektionsobjektiv 4 weitere Pupillenebenen, was zum Beispiel bei Ausführungen mit Zwischenbild der Fall ist, so kann ein Korrektorelement auch dort angeordnet sein.

[0034] Sind die refraktiven Wirkungen des Dickenverlaufs des Korrektorelements 44 störend, so kann mit aus der DE 198 07 120 A bekannten Kompensationsplatten aus nicht oder wenig doppelbrechendem Material ausgeglichen werden. Dazu können auch Linsenoberflächen z. B. durch Ionenstrahlätzen nachgeformt werden.

[0035] Der beschriebene Effekt der winkelabhängigen Doppelbrechung der Fluorid-Kristalle kann im optischen Design hochaperturiger Projektionsobjektive berücksichtigt werden. Dazu muß die Variation über den Azimutwinkel be-

rücksichtigt werden. Das Korrektorelement 44 kann dann vom Design in seiner Form vorgegeben werden.

[0036] Alternativ oder ergänzend kann aber auch die Störung der Abbildung durch die winkelabhängige Doppelbrechung gemessen und in eine Nachbearbeitung des bereitgestellten Korrektorelements 44 umgesetzt werden. Damit kann dann zugleich eine exemplarspezifische Doppelbrechungsverteilung korrigiert werden.

[0037] Die beschriebenen und zitierten und beanspruchten Maßnahmen können in unterschiedlichster Weise kombiniert werden, auch wenn dies nicht im einzelnen beschrieben ist.

#### Patentansprüche

1. Projektionsbelichtungsanlage der Mikrolithographie mit einer Lichtquelle (1), insbesondere mit einer Wellenlänge im Bereich von 200-100 nm einem Beleuchtungssystem (2), einem Masken-Positionier-System (31), einem Projektionsobjektiv (4), vorzugsweise mit einer bildseitigen numerischen Apertur (NA) im Bereich von 0,7 bis 0,95, mit einer Systemaperturebene (P) und mit einer Bildebene (5), enthaltend mindestens eine Linse (42, 43) aus einem Material, das vom Durchtrittswinkel ( $\alpha$ ) abhängige Doppelbrechung aufweist, insbesondere nahe der Bildebene (5) angeordnet, einem Objekt-Positionier-System (51), **dadurch gekennzeichnet**, daß im Beleuchtungssystem (2) oder im Projektionsobjektiv (4) nahe einer Pupillenebene (P) ein optisches Element (44) vorgesehen ist, daß eine ortsabhängige polarisationsdrehende bzw. phasenschiebende Wirkung aufweist und die von der mindestens einen Linse (42, 43) erzeugten Doppelbrechungseffekte in der Bildebene (5) mindestens teilweise kompensiert.
2. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Material der mindestens einen Linse ein kubischer Fluoridkristall, insbesondere  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{BaF}_2$  oder  $\text{SrF}_2$  ist.
3. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 1 oder Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die vom Durchtrittswinkel abhängige Doppelbrechung und die ortsabhängige polarisationsdrehende bzw. phasenschiebende Wirkung die gleiche mehrzählige, insbesondere drei- oder vierzählige Rotationssymmetrie aufweisen.
4. Projektionsbelichtungsanlage nach mindestens einem der Ansprüche 1-3, dadurch gekennzeichnet, daß die mindestens eine Linse aus besagtem Material, das eine vom Durchtrittswinkel abhängige Doppelbrechung aufweist, zwischen der Systemaperturebene und der Bildebene angeordnet ist, insbesondere als bildseitig letzte Linse.
5. Projektionsbelichtungsanlage nach mindestens einem der Ansprüche 1-4, dadurch gekennzeichnet, daß das Element mit ortsabhängiger phasenschiebender Wirkung nahe der Systemaperturebene des Projektionsobjektivs angeordnet ist.
6. Projektionsbelichtungsanlage nach mindestens einem der Ansprüche 1-5, dadurch gekennzeichnet, daß das Element mit ortsabhängiger phasenschiebender Wirkung ein optisch aktives Element, insbesondere aus Quarz, oder ein doppelbrechendes Element mit örtlich variierender Dicke ist.
7. Projektionsbelichtungsanlage nach mindestens einem der Ansprüche 1-6, dadurch gekennzeichnet, daß

in der Bildebene tangential oder radiale Polarisierung vorliegt.

8. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 6 und Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß im Beleuchtungssystem oder im objektseitigen Teil des Projektionsobjektivs radiale Polarisierung erzeugt wird und daß nahe der Systemaperturbene ein optisch aktives Element, insbesondere aus Quarz, angeordnet ist, das eine Polarisationsdrehung zur tangentialen Polarisierung mit überlagerter Kompensation der von der mindestens einen Linse erzeugten Doppelbrechungseffekte bewirkt, durch geeignete örtliche Dickenverteilung.

9. Optisches System, insbesondere mikrolithographisches Projektionsobjektiv, mit mindestens einem ersten optischen Element, das eine polarisationsabhängige Störung der Propagation über die Winkel der Lichtstrahlen eines durchtretenden Lichtbündels bewirkt, dadurch gekennzeichnet, daß mindestens ein zweites optisches Element vorgesehen ist, das eine vom Ort der Lichtstrahlen des Lichtbündels am zweiten optischen Element abhängigen Einfluß auf die Polarisierung bewirkt, derart, daß die Störung durch das erste optische Element zumindest teilweise kompensiert wird.

10. Optisches System nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß es mindestens eine Feldebene und mindestens eine dazu fouriertransformierte Pupillenebene aufweist, und das erste optische Element nahe besagter Feldebene und das zweite optische Element nahe einer besagten Pupillenebene angeordnet ist.

11. Optisches System nach Anspruch 9 oder 10, dadurch gekennzeichnet, daß die Störung der Propagation und der Einfluß auf die Polarisierung die gleiche mehrzählige, insbesondere drei- oder vierzählige Rotationssymmetrie aufweisen.

12. Optisches System, insbesondere mikrolithographisches Projektionsobjektiv, mit mindestens einem ersten und einem zweiten optischen Element, die beide eine polarisationsabhängige Störung der Propagation über die Winkel der Lichtstrahlen eines durchtretenden Lichtbündels bewirken, dadurch gekennzeichnet, daß das erste und das zweite optische Element derart um eine gemeinsame Symmetrieachse gegeneinander verdreht sind, daß die Drehwinkelbereiche maximaler Doppelbrechung des ersten und des zweiten Elements gegeneinander versetzt sind.

13. Optisches System nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß zusätzlich die Merkmale mindestens eines der Ansprüche 9-11 erfüllt sind.

14. Projektionsbelichtungsanlage der Mikrolithographie enthaltend ein optisches System nach mindestens einem der Ansprüche 9-13.

15. Herstellungsverfahren eines Mikrolithographie-Projektionsobjektivs, bei dem das Objektiv komplett montiert wird und die Wellenfront in der Bildebene vermessen wird, dadurch gekennzeichnet, daß eine mehrzählige, insbesondere drei- oder vierzählige rotationssymmetrische Störung ausgewertet wird und davon abhängig das Dickenprofil eines optischen Elements, das insbesondere pupillennah angeordnet ist, mit der gleichen mehrzähligen Rotationssymmetrie verändert wird, so daß die mehrzählige rotationssymmetrische Störung der Wellenfront in der Bildebene zumindest teilweise kompensiert wird.

16. Herstellungsverfahren nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, daß das Mikrolithographie-Projektionsobjektiv ein optisches System nach mindestens einem der Ansprüche 9-13 und/oder Teil einer Projektionsbelichtungsanlage nach mindestens einem der Ansprüche 1-8 und 14 ist.

17. Mikrolithographisches Strukturierverfahren, gekennzeichnet durch die Verwendung einer Projektionsbelichtungsanlage nach mindestens einem der Ansprüche 1-8 und 14 oder enthaltend ein optisches System nach mindestens einem der Ansprüche 9-13 oder hergestellt nach Anspruch 15 oder 16.

---

Hierzu 1 Seite(n) Zeichnungen

---

- Leerseite -

